鄂尔多斯高原砒砂岩区植被恢复潜力

戚 曌， 闫 峰， 席 磊， 曹晓明， 邹佳秀， 冯益明

（中国林业科学研究院生态保护与修复研究所，北京 100091）

摘 要： 评估黄河流域砒砂岩区的植被承载力，可以为流域植被建设和土地退化问题治理提供科学依据。本研究以鄂尔多斯高原砒砂岩典型分布区为研究区，基于植被在不同地形因素下的差异性分布划分为不同的砒砂岩生境类型，分析2000—2022年不同生境类型下植被变化趋势，并通过植被覆盖度反演得到的地上生物量定量化探究其承载潜力。结果表明：鄂尔多斯高原总体植被覆盖度每年以3.7%的速率缓慢增加，其中裸露砒砂岩区增长速率最高，覆沙砒砂岩区增加速率最低。2022年全区地上生物量相对于2000年增长了115.5%，达到219.49 $g·m^{-2}$，其中覆土砒砂岩区地上生物量年均值最高（185.29 $g·m^{-2}$）。植被覆盖度变化以及地上生物量在空间分布上类似，呈东南方向高，西北方向低。对照实际地上生物量发现裸露、覆沙、覆土砒砂岩区的植被地上生物量的现有量分别占其可承载潜力的75.2%、80.9%、84.2%。总的来说，各区域植被呈现增加趋势，仍有一定的发展潜力，其中裸露砒砂岩区增加潜力最大。

关键词： 砒砂岩区；植被承载力；地上生物量；植被覆盖度；生态治理

砒砂岩由古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的灰色、灰黄、灰紫色的砂页岩、紫红色的泥质砂岩和厚层砂岩的岩石层组成，集中分布于黄土高原北部晋陕蒙三省交界地区的鄂尔多斯高原[1-2]。砒砂岩具有沙粒黏结性差的特点，由于其成岩难、结构弱，易受重力、风和水等因素的影响，导致水土流失，土壤侵蚀严重，植被稀疏，沟壑发育广泛。此外砒砂岩区也是黄河粗泥沙主要来源，对流域生态安全造成严重威胁[3-4]，近年来，我国针对该区水土流失问题采取了一系列治理措施，如砒砂岩区沙棘生态建设、退耕还林（草）等多项治理工程[5-6]，取得了一定的成效，但生态环境整体退化的趋势仍然存在，砒砂岩区生态治理依旧面临巨大挑战[7]。

植被作为生态系统的重要组成部分，影响着土壤肥力、生物多样性、气候调节、水循环等生态功能[8-9]，是评估生态环境状况的重要指示因子，同时也是生态修复措施必不可少的。植被承载力是指某一特定环境条件下，单位面积可供给植被生长的最大数量[10]，表征区域生态系统状况及发展潜力，能够较好地反映区域水、热和土壤等生态环境特征。通过分析植被合理的空间承载状况，可以更好的促进生态治理措施的高质量实施[11-12]，是衡量生态系统发展趋势，维持系统稳定，促进植被恢复和保护，进而增强系统承载能力的常用指标之一。

植被承载力常选取植被指数作为量化特征，如高海东等[13]通过归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）对黄土高原的植被恢复潜力展开研究；刘广全等[14]通过植被种植密度来对黄土高原生态脆弱区的植被恢复及承载力进行分析；张举涛[15]利用叶面积指数来对中国北方典型沙区植被可承载叶面积阈值进行分析探讨。关于砒砂岩区域的承载潜力研究，朱雅娟等[16]对覆土砒砂岩区开展了水资源承载力的相关研究；王瑞杰等[17]从人口数量与粮食产量的角度对砒砂岩土地承载力进行分析；夏静芳[18]以内蒙古准格尔旗砒砂岩地区为例开展不同林龄和林地类型下沙棘持水量研究。植被生产力相关的定量化承载潜力分析较为缺乏，而砒砂岩区的植被稀疏矮小，不适宜选用植被密度或者叶面积指数作为表征指数，NDVI不能定量化描述区域承载量，而生物量作为量化区域生

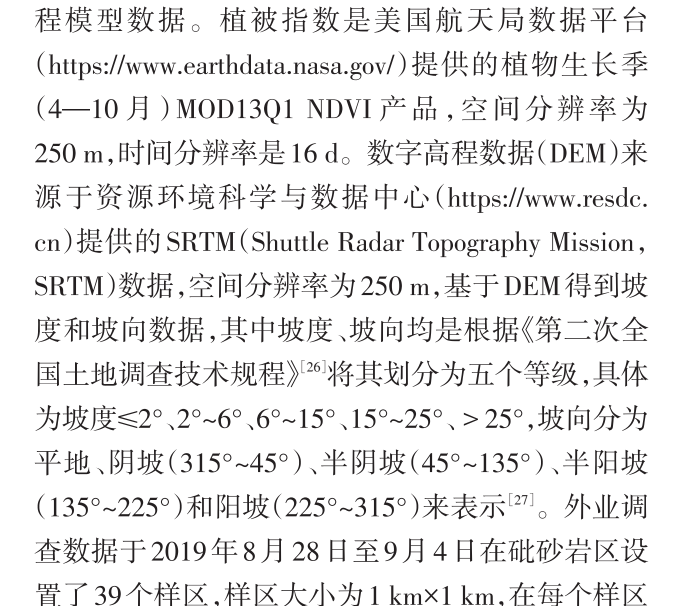
收稿日期： 2024-03-26； **修订日期：** 2024-06-25
基金项目： 第三次新疆综合科学考察（2021xjkk0304）
作者简介： 戚曌（1996-），女，博士，主要从事遥感技术应用研究. E-mail: qizhao1104@163.com
通讯作者： 冯益明. E-mail: fengym@caf.ac.cn

产力的重要指数，更适宜于作为表征植被生态系统数量的特征指数[19]，而植被在不同的坡向、坡度，其生长状况也有很大差异[20-22]，所以在进行砒砂岩区植被潜力评估时必须综合考虑地形因素的影响。本研究选用2000—2022年MOD13Q1植被指数、数字高程(DEM)数据产品为数据源，结合植被盖度(Fractional Vegetation Cover，FVC)计算得到植被地上生物量，然后从砒砂岩类型、高程、坡度、坡向角度分析区域植被生长的地形效应，以此划分不同的砒砂岩生境类型，进而得到研究区不同生境类型下可以承载的最大植被覆盖度和地上生物量，为植被恢复和合理安排造林密度提供支持，对黄河流域生态治理具有重要的现实意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市东南方向和陕西省榆林市的东北方向(图1)，处于河套平原黄河"几"字弯内，地理范围在38°40′12″~40°16′48″N，108°46′48″~111°37′12″E之间。区域气候属于温带大陆性气候，年均降水量较小，在300 mm左右，且集中在夏季，昼夜温差大，年均潜在蒸发量高于2000 mm[23-24]。海拔高度在801~1621 m，地势整体属于西北方向高，东南方向低。不同坡向的气候也有明显差异，其中西北方向的温度、降水以及蒸散发量均高于东南方向。区域内风沙活动频繁，土壤侵蚀严重，土壤类型以草甸土为主，植被类型多为沙生、盐生的灌木植被[25]，受地形效应的影响，在区域内形成了异质性较强的多种砒砂岩生境类型。

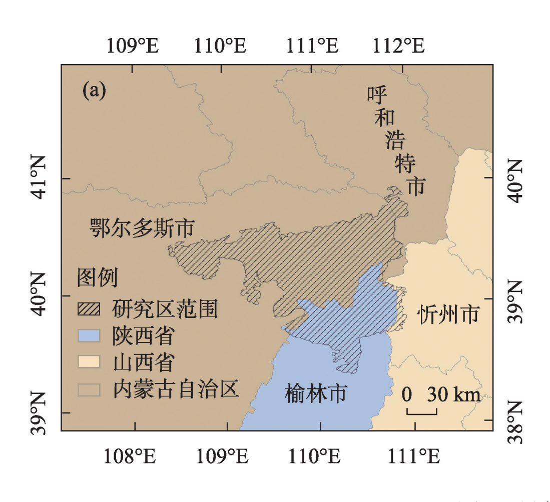


1.2 数据来源与处理

本研究的数据源主要分为遥感数据和外业调查数据两部分。遥感数据包括植被指数和数字高程模型数据。植被指数是美国航天局数据平台(https://www.earthdata.nasa.gov/)提供的植物生长季(4—10月)MOD13Q1 NDVI产品，空间分辨率为250 m，时间分辨率是16 d。数字高程数据(DEM)来源于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)提供的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission，SRTM)数据，空间分辨率为250 m，基于DEM得到坡度和坡向数据，其中坡度、坡向均是根据《第二次全国土地调查技术规程》[26]将其划分为五个等级，具体为坡度≤2°、2°~6°、6°~15°、15°~25°、>25°，坡向分为平地、阴坡(315°~45°)、半阴坡(45°~135°)、半阳坡(135°~225°)和阳坡(225°~315°)来表示[27]。外业调查数据于2019年8月28日至9月4日在砒砂岩区设置了39个样区，样区大小为1 km×1 km，在每个样区设置了5个1 m×1 m的样方，将样方内的所有植被沿地表剪下，并用天平称其鲜重，然后，将样品装入采样袋，在实验室中利用烘箱充分烘干样品水分，得到样品干重[28]，获取各样方的植被地上生物量。

1.3 研究方法

1.3.1 地形效应 砒砂岩不同类型区的植被在不同地形条件下存在差异，因此选取了高程、坡度、坡向等分析植被在不同立地条件下的差异，从而证明选择这些指标的合理性。研究通过变异系数C_v(Coefficient of Variation)来分析其差异性[29]，采用不同坡向的植被覆盖度差值与均值的比例系数来表达地形差异对植被覆盖度的影响[30]，计算公式如下：



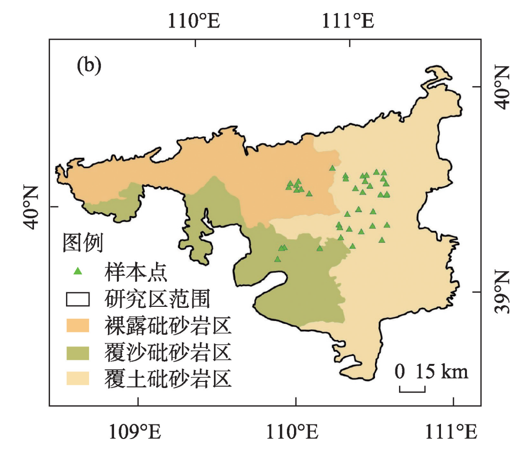


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

$$C_v = \frac{MD}{Mean} \times 100\% \quad (1)$$

式中:MD表示阴坡、阳坡两个坡向的FVC均值差值;Mean表示各坡向的植被盖度均值。C_v值越接近0,表示植被分布差异性越小,大于0表示阳坡植被覆盖度大,小于0表示阴坡植被覆盖度大。

1.3.2　*植被覆盖度计算*　植被覆盖度是指植被冠幅的垂直投影面积占统计区总面积的百分比。砒砂岩地区沙化现象严重、植被相对稀疏,地物空间异质性十分明显,对应到遥感影像存在大量的混合像元,在混合像元分解方法研究中,像元二分模型估算精度高且不需要实测数据,使用范围广,具体计算公式[31]如下:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (2)$$

式中:FVC表示植被覆盖度;$NDVI_{soil}$、$NDVI_{veg}$分别表示纯土壤像元和纯植被像元的NDVI值,本研究采用[0.5,99.5]的置信区间来分别选取$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$的值。

1.3.3　*植被地上生物量反演*　本研究基于获得的植被地上生物量样本数据,在模拟过程中,按照2:1的比例将地上生物量样本划分为实验样本和验证样本,找到与采样时间点高度重合的2019年第241 d的MOD13Q1植被指数数据进行建模,首先利用各样点的经纬度信息,提取各样点的NDVI值,然后利用实测生物量数据,构建一元线性方程,从而获取砒砂岩区整个区域的地上生物量空间分布图,并用验证样本对反演结果进行验证,最后利用生物量反演模型,获取砒砂岩区及不同类型区2000—2022年4—10月的最大生物量分布数据。

1.3.4　*砒砂岩区生境类型划分*　鄂尔多斯高原砒砂岩区根据地表土壤覆盖差异可以划分为覆土砒砂岩区、覆沙砒砂岩区和裸露砒砂岩区三种类型[32],各类型区内的地形复杂多变,生境类型有所差异,对应的植被承载力也不同,所以本研究拟基于砒砂岩类型、海拔、坡度、坡向四个指标,结合不同砒砂岩类型区的植被分布状况及其地形效应分析结果,来划分不同的生境类型,并计算其植被承载潜力,如图2所示。第一级指标为砒砂岩类型,包括覆土区、覆沙区、裸露区3个类型,第二级指标为海拔,第三级指标为坡度,第四级指标为坡向,均按照地形效应差异进行等级划分。

1.3.5　*植被承载力计算*　不同生境类型下植被盖度以及地上生物量的像元累计分布近似于正态分布,以覆土砒砂岩区某一地形单元范围内的像元分布频率直方图为例可以看出(图3),其植被盖度的峰

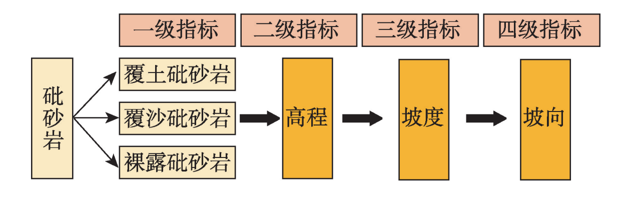


图2　砒砂岩区生态承载力指标体系

Fig. 2　Index system of ecological carrying capacity in soft rock area

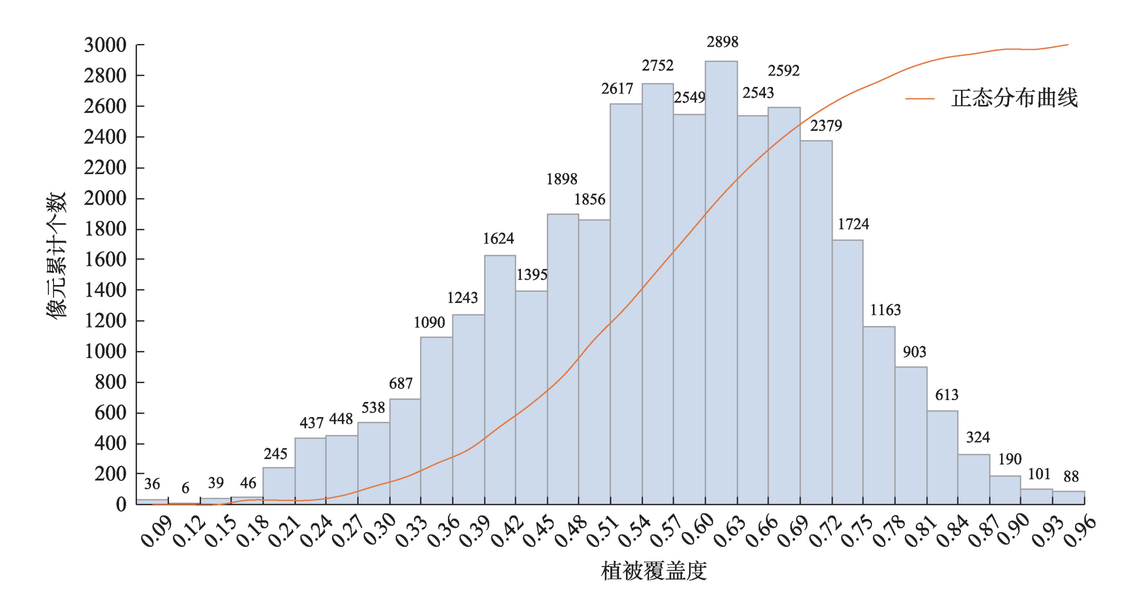


图3　覆土砒砂岩区高程1100~1200 m、坡度≤2°、阴坡处FVC累计分布

Fig. 3　Cumulative FVC distribution at elevation 1100~1200 m, slope≤2° and shady slope in soil-covered soft rock area

值主要位于0.56附近，数值大多分布于0.51~0.73，有约90%的像元植被盖度在0.75以内，植被盖度在0.75以上的像元数相对较少，在植被盖度像元累计到90%时的数值已经可以包含了绝大部分植被盖度情况，为去除异常值对植被盖度精度的影响，选择更具有代表性和可操作性的90%作为植被承载潜力阈值。

2 结果与分析

2.1 地形效应分析

结合表1不同坡向下各坡度等级的植被覆盖度变化可以看出，不同砒砂岩区中覆土砒砂岩区总体大于覆沙区和裸露区，随着坡度增加，各坡向植被覆盖度有明显增加的趋势，且各坡向内植被覆盖度的差异也随之增加，其中裸露砒砂岩区和覆土砒砂岩区在2°~6°时有轻微减少，覆沙砒砂岩区在≤2°和2°~6°以内差异不大。从表2不同海拔梯度植被盖度的变异系数分析可以看出，砒砂岩区总体以及各类型均在不同高程类别之间差异较大，总体看来高程在1100 m以内的C_v值大于0，阳坡植被覆盖度大于阴坡，而在高程1400~1500 m时差异最大，为−2.0%。各砒砂岩类型区中，裸露砒砂岩区在高程1000~1100 m和1500 m以上的C_v值为正值，其中1000~1100 m的C_v绝对值最大，为13.8%，其余高程等级均小于0，而在高程1100~1200 m时绝对值最大，为−4.9%。覆沙砒砂岩区除了在高程1000~1100 m时为正值，其余均为负值，高程≤1000 m的差异最大，为−6.8%，其次为高程＞1500 m和1200~1300 m。覆土砒砂岩区高程在1100 m内的C_v值大于0，差异最大在高程1300~1400 m的范围内，为−3.1%，和全区分布状况相似，总的来说在裸露砒砂岩区1000~1100 m的高程范围内差异最大。与此同时也可以看出研究区总体在坡度>25°时的差异最大，为1.9%，在2°~6°和15°~25°时C_v值小于0，阴坡植被覆盖度大于阳坡。在各砒砂岩类型中，裸露砒砂岩区在≤2°时C_v值小于0，为−4.1%，也是差异最大的区域，覆沙砒砂岩区在坡度25°以内的C_v值均小于0，阴坡植被覆盖度大于阳坡，但在>25°时的差异最大为23.3%，覆土砒砂岩区在2°~25°的C_v值小于0，≤2°时的差异最大为2.5%，总的来说在覆沙砒砂岩区>25°的坡度范围内差异最大。

表1 砒砂岩区在不同坡度、坡向的植被覆盖度分布

Tab. 1 Vegetation coverage distribution of soft rock area at different gradient and slope

类型	坡向	≤2°	2°~6°	6°~15°	15°~25°	>25°
$FVC_{裸露砒砂岩区}$	阴坡	0.34	0.32	0.40	0.50	−
	半阴坡	0.35	0.32	0.40	0.41	−
	阳坡	0.36	0.32	0.40	0.44	−
	半阳坡	0.35	0.31	0.38	0.45	0.52
$FVC_{覆沙砒砂岩区}$	阴坡	0.48	0.47	0.51	0.52	0.59
	半阴坡	0.49	0.47	0.51	0.51	0.35
	阳坡	0.50	0.49	0.52	0.52	0.43
	半阳坡	0.49	0.49	0.5	0.54	0.46
$FVC_{覆土砒砂岩区}$	阴坡	0.58	0.57	0.58	0.61	0.61
	半阴坡	0.59	0.57	0.57	0.57	0.52
	阳坡	0.58	0.57	0.58	0.59	0.53
	半阳坡	0.55	0.58	0.59	0.61	0.62

表2 砒砂岩区不同高程、坡度下的C_v值

Tab. 2 C_v values at different elevations and gradients in the soft rock area

类型	分级	$C_{v裸露砒砂岩区}$/%	$C_{v覆沙砒砂岩区}$/%	$C_{v覆土砒砂岩区}$/%	C_{vMean}/%
高程	≤1000 m	−	−6.8	0.4	0.1
	1000~1100 m	13.8	0.3	0.4	0.3
	1100~1200 m	−4.9	−0.2	−1.0	−0.8
	1200~1300 m	−1.1	−4.0	−2.3	−1.7
	1300~1400 m	−0.2	−2.1	−3.1	−0.1
	1400~1500 m	−0.4	−3.9	−2.2	−2.0
	>1500 m	0.7	−4.4	−	−1.8
坡度	≤2°	−4.0	−1.4	2.5	0.1
	2°~6°	0.2	−3.4	−0.7	−0.3
	6°~15°	2.9	−1.2	−1.5	0.6
	15°~25°	2.9	−4.2	−1.0	−1.4
	>25°	−	23.3	1.7	1.9

2.2 不同类型砒砂岩区植被盖度状况

2000—2022年多年平均植被盖度变化如图4所示，可以看出区域整体的年均植被覆盖度呈现缓慢增加的趋势，以2000年为基准年发现其多年增长速率为年均3.7%，其中在2011年和2012年变化趋势最为明显，2010—2011年减少速率为年均28.1%，2011—2012年增加速率为年均63.3%，2013年、2020年和2022年植被覆盖度相对较高，分别为0.60、0.58和0.62；2000年、2001年和2011年相对最低，为0.34、0.36和0.35。对于不同砒砂岩类型区，裸露砒砂岩区相对较低，裸露、覆沙、覆土砒砂岩区多年年均植被盖度增加速率分别为4.9%、2.8%和

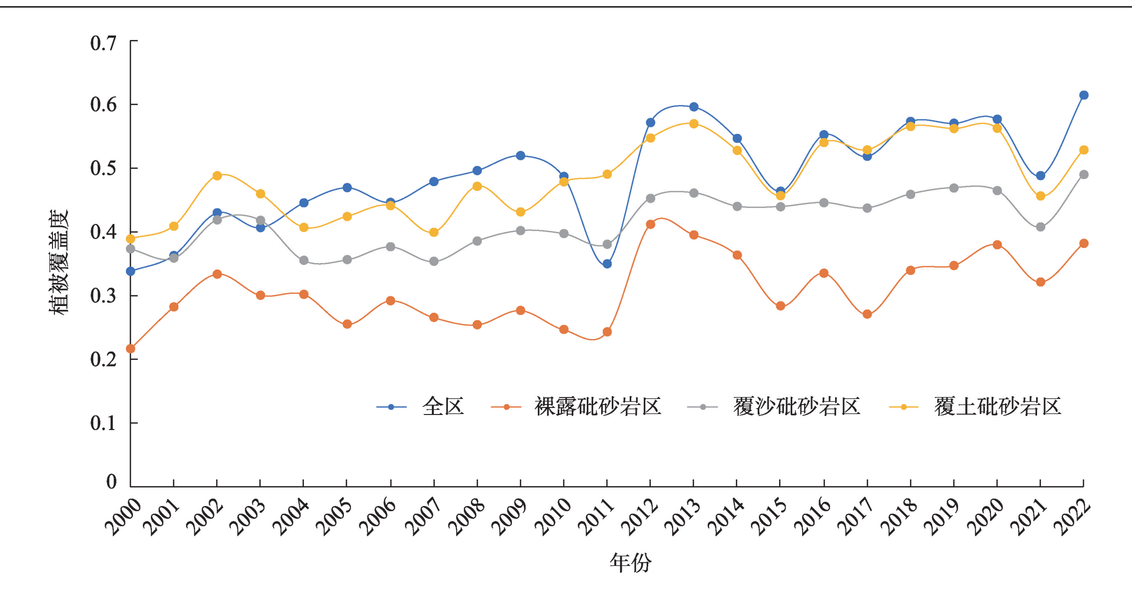


图4　2000—2022年砒砂岩区植被覆盖度均值变化

Fig. 4　Mean change of vegetation coverage in soft rock area from 2000 to 2022

3.8%,裸露砒砂岩区的增长速率最高,但每年覆土砒砂岩区植被覆盖度均是大于覆沙砒砂岩区、裸露砒砂岩区,覆沙砒砂岩区的总体变化趋势和全区植被覆盖度几乎重叠,且全区变化趋势和各类型区域一致。其中裸露砒砂岩区以2012年、2013年和2022年相对最高,为0.46,0.44和0.45,以2000年、2011年和2015年相对最低,为0.22,0.19和0.28;覆沙砒砂岩区以2013年、2020年和2022年相对最高,为0.57,0.57和0.60,以2000年、2001年和2011年相对最低,为0.37,0.36和0.36;覆土砒砂岩区以2013年、2019年和2022年相对最高,为0.69,0.68和0.71,以2000年、2001年和2011年相对最低,为0.39,0.41和0.44。

由2000—2022年植被盖度在空间上的变化可以看出(图5),西北方向低,空间变化率以负值为主,东南部高,空间变化率多为正值。覆土砒砂岩区主要位于研究区的东部地区,裸露砒砂岩区主要位于西北方向,覆沙砒砂岩区主要位于西南方向,所以不同类型的砒砂岩植被盖度变化趋势具有一定差异。

2.3　不同类型砒砂岩区植被地上生物量分布状况

利用地上生物量计算模型,获得砒砂岩全区及不同类型区2000—2022年4—10月地上生物量分布数据,以2000年、2005年、2010年、2015年、2020年和2022年为例(图6)。砒砂岩区地上生物量与植被盖度呈现相似的空间分布特征,即西北部低,东部及东南部高的空间分布特征,且每年都有较为明显的增长趋势。全区生长季地上生物量均值从2000年的101.87 g·m^{-2}增加到2022年的219.49 g·m^{-2},增幅达115.5%,增长趋势最大的是2002年,从2001年的103.10 g·m^{-2}增长到2002年的148.30 g·m^{-2},增长速率为43.8%。裸露区、覆沙区、覆土区的增幅分别为125.6%、99.4%和118.7%,三个区域生长季地上生物量都呈明显增加趋势,裸露区和覆土区增幅对全区增幅贡献最大,而覆土区生长季地上生物量均值依次高于覆沙区和裸露区,分别为185.29 g·m^{-2}、165.08 g·m^{-2}和130.85 g·m^{-2}。

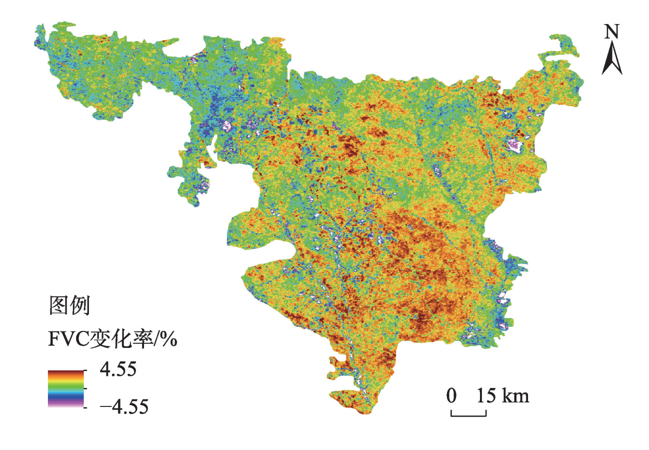


图5　砒砂岩区FVC空间变化趋势

Fig. 5　Spatial variation trend of FVC in soft rock area

2.4　砒砂岩生境类型划分及其植被承载力

基于不同砒砂岩类型区地形效应分析后的结果,将其划分为不同地形条件下的生境类型,各级

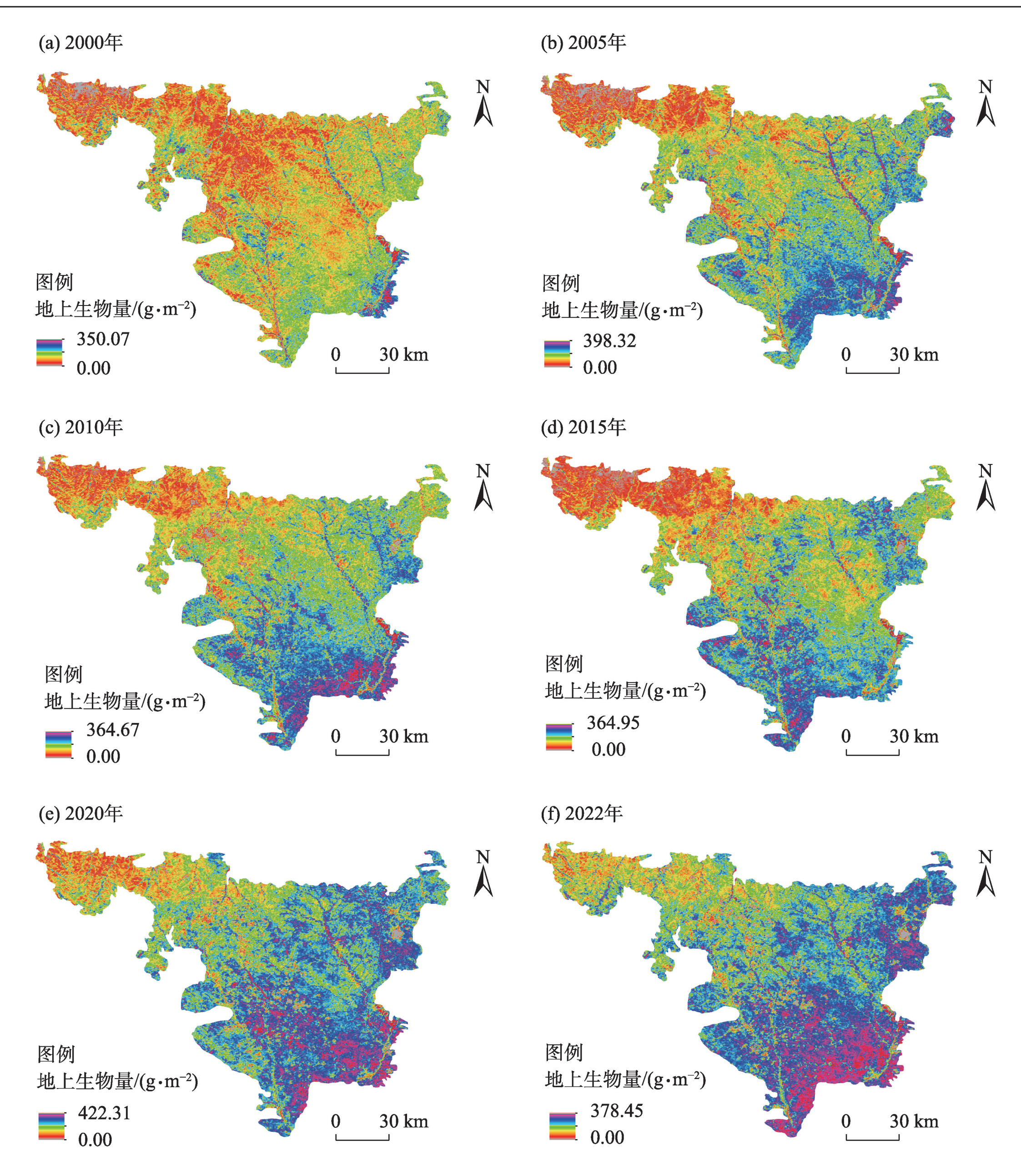


图6 砒砂岩区地上生物量分布

Fig. 6 Above-ground biomass distribution in soft rock area

指标的具体划分标准如下：

第一级指标为砒砂岩类型，包括覆土区、覆沙区、裸露区3个类型。

第二级指标为海拔，均划分为3类，其中覆沙砒砂岩区为<1000 m、1000~1200 m、>1200 m；覆土砒砂岩区和裸露覆沙砒砂岩区为<1100 m、1100~1200 m、>1200 m。

第三级指标为坡度，覆土砒砂岩区划分为≤2°、2°~25°、>25° 3个等级；覆沙、裸露砒砂岩区划分为≤15°、15°~25°、>25° 3个等级。

第四级指标为坡向，划分为阳坡、半阳坡、阴坡和半阴坡4个等级。

以此为依据，按照90%的阈值建立不同砒砂岩生境类型下的植被盖度及地上生物量承载力阈值，表3为某一个高程范围内的各类砒砂岩区植被承载潜力值和地上生物量承载潜力值。

2.5 不同类型砒砂岩区的植被恢复潜力

依据不同类型区各单元承载潜力状况测算整个区域的地上生物量承载总量，如表4所示，可以看出因覆土砒砂岩区的面积要明显多于其余两个类型区域，其可承载生物量也明显多于其余两个类型区域，为1859.89×10^9 g，从单位面积可承载地上生物

表3 各砒砂岩类型区在某一高程范围内的植被承载力

Tab. 3 Vegetation carrying capacity of each soft rock area in a certain elevation range

砒砂岩区类型	坡度	坡向	植被覆盖度	地上生物量/(g·m^{-2})
覆土砒砂岩区 高程1100~1200 m	<2°	阴坡	0.75	223.74
		半阴坡	0.76	224.62
		阳坡	0.762	225.69
		半阳坡	0.76	225.49
	2°~25°	阴坡	0.73	220.16
		半阴坡	0.72	218.23
		阳坡	0.73	219.20
		半阳坡	0.72	217.02
	>25°	阴坡	0.69	224.30
		半阴坡	0.66	199.87
		阳坡	0.73	219.45
		半阳坡	0.67	195.55
覆沙砒砂岩区 高程1000~1200 m	<15°	阴坡	0.71	214.28
		半阴坡	0.75	223.21
		阳坡	0.75	223.02
		半阳坡	0.76	226.73
	15°~25°	阴坡	0.72	216.65
		半阴坡	0.71	213.18
		阳坡	0.53	210.48
		半阳坡	0.70	211.91
	>25°	阴坡	0.62	194.65
		半阴坡	0.55	179.45
		阳坡	0.74	220.54
		半阳坡	0.37	155.54
裸露砒砂岩区 高程1000~1200 m	<15°	阴坡	0.80	234.28
		半阴坡	0.80	234.05
		阳坡	0.73	219.27
		半阳坡	0.77	226.33
	15°~25°	阴坡	0.71	213.93
		半阴坡	0.61	193.13
		阳坡	0.61	192.98
		半阳坡	0.65	200.29
	>25°	阴坡	–	–
		半阴坡	–	–
		阳坡	–	–
		半阳坡	–	–

量来看,覆土砒砂岩区土壤性质更好,数值最大,为0.22×10^6 g·m^{-2},裸露砒砂岩区土壤性质偏弱,数值最小,为0.17×10^6 g·m^{-2}。

以2022年植被地上生物量计算结果为现状,将砒砂岩区域地上生物量承载潜力与现状进行对比,结果如表5所示。可以看出,研究区现有地上生物

表4 不同类型砒砂岩区可承载地上生物量总量值

Tab. 4 Total above-ground biomass of different types of soft rock areas

砒砂岩区类型	面积/10^3 m^2	总地上生物量/10^9 g	单位面积可承载地上生物量/(10^6 g·m^{-2})
覆土砒砂岩区	8419.35	1859.89	0.22
覆沙砒砂岩区	3798.43	778.68	0.21
裸露砒砂岩区	4607.66	804.95	0.17
合计	16825.43	3443.52	0.20

表5 不同砒砂岩区地上生物量现状与承载潜力对照

Tab. 5 Comparison of above-ground biomass status and carrying potential in different soft rock areas

砒砂岩区类型	面积/10^3 m^2	地上生物量承载/10^9 g	地上生物量现状/10^9 g	占比/%
覆土砒砂岩区	8419.35	1859.89	1565.46	84.2
覆沙砒砂岩区	3798.43	778.68	629.66	80.9
裸露砒砂岩区	4607.66	804.95	605.62	75.2
合计	16825.43	3443.52	2800.74	81.3

量已经达到可承载总量的81.3%,其中覆土砂岩区的地上生物量占比相对较大,占可承载力的84.2%,而裸露砂岩区的地上生物量占比相对较小,为75.2%,尚有较大潜力。

3 讨 论

砒砂岩区面临的主要生态问题是水土流失严重,土壤条件随着海拔等立地条件的差异有一定程度的分化,同时植被的生长也受土壤状况、气候等多方面因素影响。杨静涵[33]在针对黄土丘陵沟壑区进行土壤养分特征的差异性分析中发现,高程、坡度、坡向和NDVI对于土壤中的有机质、全氮、速效养分部分区域范围的变异有较强的解释能力。贾海坤等[34]在研究植被盖度与土壤水分之间的关系时发现不同坡度、坡向下,土壤水分有一定的差异,植被盖度在不同立地条件下敏感性也有所不同。本研究从海拔、坡度、坡向的角度来分析各砒砂岩类型的植被地形差异分析,进而划分出不同的砒砂岩生境类型,和上述研究结果有一定的对应性,也使得探索其地上生物量承载状况的结果更具有说服力。

植被生物量可以直观反映植被资源状况以及环境变化,而遥感技术的发展也为大范围区域生物量估算提供技术支撑,翟鹏程[35]研究发现MODIS

NDVI数据与实测地上生物量有显著相关性，可以用于构建生物量估算模型，且MODIS数据具有高时间分辨率，可以更好的保障实测地上生物量与植被指数之间关系的真实性。砒砂岩区近二十多年来的植被覆盖度有所增加，其中2011年植被有更为明显的降低，根据鄂尔多斯气象局的气候分析[36]显示，2010年10月至2011年1月，鄂尔多斯高原受大气环流影响造成极端寒冷事件的发生，较往年同期气温降低3~4 ℃，降水将至历史新低，干旱问题突出，到了11月又出现了罕见的长阴雨天气，这和研究区2011年植被降低，2012年又有明显上升的趋势一致，说明该地区植被受极端天气事件的影响较为突出。

本研究各年份地上生物量反演结果为0~400 $g\cdot m^{-2}$以内，姜亚东等[37]在对西鄂尔多斯进行地上生物量研究中发现各灌丛类型的地上生物量均值约在150 $g\cdot m^{-2}$，范围为0~600 $g\cdot m^{-2}$以内，这个结果和本研究反演的结果较为相近，侧面印证了本研究基于该数据对地上生物量的承载状况的分析具有科学性。地上生物量自西北方向的裸露区至东南方向的覆土区依次增高，覆土砒砂岩区多年均值为185.29 $g\cdot m^{-2}$，裸露砒砂岩区多年均值为130.85 $g\cdot m^{-2}$，这也说明了研究区土壤性质的差异性。

4 结 论

研究根据不同砒砂岩类型下的地形效应分析划分出不同的生境类型，然后从植被覆盖度以及地上生物量来分析承载力，其中植被覆盖度2022年相对于2000年增加了81.6%，地上生物量相对于2000年增长115.5%，达到219.49 $g\cdot m^{-2}$，对比地上生物量分布现状，全区已覆盖量占可承载量的81.3%，其中裸露区可开发潜力最大，现有覆盖量占其可承载潜力的75.2%，该结果也反映出覆土区植被覆盖按照现在的立地条件已达到较高状态，裸露区植被生长的立地环境相对较弱，也已达到可承载地上生物量的四分之三，在进行植被建设的同时，要着重去改变其土壤条件，增加其可承载潜力。

参考文献(References)：

[1] 邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报, 1999, 19(3): 13−21. [Deng Qidong, Cheng Shaoping, Min Wei, et al. Discussion on cenozoic tectonics and dynamics of Ordos Block[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 1999, 19(3): 13−21.]

[2] 王立久, 李长明, 董晶亮. 砒砂岩分布及岩性特征[J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 91−93, 97. [Wang Lijiu, Li Changming, Dong Jingliang. Study on distribution and lithologic characters of feldspathic Sandstone[J]. Yellow River, 2013, 35(12): 91−93, 97.]

[3] 董晶亮, 陈磊伟, 郑福焱, 等. 砒砂岩的结构组成研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(5): 10−19. [Dong Jingliang, Chen Leiwei, Zheng Fuyan, et al. Study on the structural composition of Pisha Sandstone[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 10−19.]

[4] 杨霜奇, 宋乃平, 王兴, 等. 荒漠草原灰钙土与风沙土水分时空特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1625−1636. [Yang Shuangqi, Song Naiping, Wang Xing, et al. Spatiotemporal characteristics of sierozem and aeolian soil moisture levels in a desert steppe[J]. Arid Land Research, 2023, 40(10): 1625−1636.]

[5] 许吉康. 砒砂岩区不同生态修复植被根际土壤微生态环境特征及土壤质量评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [Xu Jikang. Rhizosphere Soil Microecological Environment Characteristics and Soil Quality Evaluation of Different Ecological Restoration Vegetation in the Arsenic Sandstone Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]

[6] 李金霞. 鄂尔多斯高原西部植被—土壤—土壤动物对荒漠化的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2012. [Li Jinxia. The response of Vegetation-Soil-Soil Fauna to Desertificationin the Western of Ordos Plateau[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.]

[7] Liang Z S, Wu Z R, Yao W, et al. Pisha sandstone: Causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(1): 1−8.

[8] 张鹤. 砒砂岩区不同植被恢复和覆土厚度下土壤性状特征及质量评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. [Zhang He. Arsenic Soil Properties and Quality Evaluation Under Different Vegetation Restoration and Soil Covering Thickness in Pisha Sandstone Area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.]

[9] 王娟, 王钊, 郭斌, 等. 陕西黄河流域植被碳利用率时空特征及对气候的敏感性研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1959−1968. [Wang Juan, Wang Zhao, Guo Bin, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation carbon use efficiency and its sensitivity to climate in the Yellow River Basin in Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1959−1968.]

[10] 洪光宇. 毛乌素沙地杨柴和沙柳的蒸腾耗水特征及人工林地植被承载力[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [Hong Guangyu. Vegetation Water Consumption and Soil Water Vegetation Carrying Capacity of *Hedysarum leave* and *Salix psammophila* Plantations in Mu Us Desert Land[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]

[11] Jiao L, An W M, Li Z S, et al. Regional variation in soil water and vegetation characteristics in the Chinese Loess Plateau[J]. Ecologi-

cal Indicators, 2020, 115(10): 63-99.

[12] Wang R J, Yan F, Wang Y J. Vegetation growth status and topographic effects in the Pisha Sandstone Area of China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2759-2759.

[13] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874. [Gao Haidong, Pang Guowei, Li Zhanbin, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 863-874.]

[14] 刘广全, 匡尚富, 土小宁, 等. 黄土高原生态脆弱地带植被恢复水资源承载能力[J]. 国际沙棘研究与开发, 2010, 8(1): 13-20. [Liu Guangquan, Kuang Shangfu, Tu Xiaoning, et al. Water resources carrying capacity for vegetation restoration of eco-fragile region in the Loess Plateau[J]. International Research and Development of Sea-buckthorn, 2010, 8(1): 13-20.]

[15] 张举涛. 中国北方典型沙区植被承载力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [Zhang Jutao. Carrying Capacity for Vegetation Across Typical Sandy Regions in Northern China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.]

[16] 朱雅娟, 党宏忠, 杜娟, 等. 覆土砒砂岩区沙棘耗水量及其影响因子[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 171-177, 183. [Zhu Yajuan, Dang Hongzhong, Du Juan, et al. Water Consumption of Hippophae rhamnoides and its affecting factors in Loess-Covered Pisha Rock Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 171-177, 183.]

[17] 王瑞杰, 吴林荣, 闫峰. 基于人粮关系的鄂尔多斯砒砂岩区土地资源承载力变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 142-148, 154. [Wang Ruijie, Wu Linrong, Yan Feng. Variation characteristics of land resources carrying capacity in Ordos field spathic sandstone area based on man-grain relationship[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 142-148. 154.]

[18] 夏静芳. 沙棘人工林水土保持功能与植被配置模式研究——以内蒙古准格尔旗砒砂岩地区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. [Xia Jingfang. A Study on the Soil and Water Conservation Functions of Artifical Sea-buckthorn Forests and the Vegetation Constration Model in the Sandstone Areas of Jungar Banner, Inner Mongolia[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.]

[19] 周静, 孙永峰, 丁杰萍, 等. 退化沙质草地恢复过程中植被生物量变化及其与土壤碳的关系[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1457-1464. [Zhou Jing, Sun Yongfeng, Ding Jieping, et al. Changes in vegetation biomass and its relationship with soil carbon during restoration processes in degraded sandy grasslands[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1457-1464.]

[20] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. 人民黄河, 2018, 40(6): 1-7, 65. [Yao Wenyi, Li Changming, Zhang Pan, et al. Prospect and research on the erosion mechanism of Pisha Sandstone[J]. Yellow River of People, 2018, 40(6): 1-7, 65.]

[21] 苏涛, 张兴昌, 王仁君, 等. 植被覆盖对砒砂岩地区边坡侵蚀的减流减沙效益[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 98-101, 255. [Su Tao, Zhang Xingchang, Wang Renjun, et al. Effect of vegetation coverage on slope runoff and sediment reduction in Pisha Sandstone region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 98-101, 255.]

[22] 王婧, 李龙, 张鹏, 等. 植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3934-3947. [Wang Jing, Li Long, Zhang Peng, et al. Effects of vegetation pattern on rainfall erosion on Pisha sandstone slope land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3934-3947.]

[23] 韩高玲, 霍建强, 赵燕翘, 等. 鄂尔多斯高原砒砂岩地区草本物种组成及多样性[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 243-251. [Han Gaoling, Huo Jianqiang, Zhao Yanqiao, et al. Analysis of herbaceous species composition and diversity in the Ordos Arsenic Sandstone Areas[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 243-251.]

[24] 赵蒙恩, 闫庆武, 刘政婷, 等. 鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1819-1831. [Zhao Meng'en, Yan Qingwu, Liu Zhengting, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1819-1831.]

[25] 张换迪. 鄂尔多斯砒砂岩区植物和土壤微生物多样性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019. [Zhang Huandi. Study on Plant and Microorganism Diversity of Pisha Sandstone Area in Ordos[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.]

[26] 中华人民共和国土地管理行业标准(TD/T 1014—2007) [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2007. [Land Management Industry Standard of the People's Republic of China (TD/T 1014-2007) [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2007.]

[27] 王瑞杰, 闫峰. 2000—2018年西北砒砂岩区植被覆盖度与地形效应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1194-1202. [Wang Ruijie, Yan Feng. Fractional vegetation cover and topographic effects in Pisha sandstone area of Northwest China in 2000-2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1194-1202.]

[28] 高丽, 朱清芳, 闫志坚, 等. 放牧对鄂尔多斯高原油蒿草场生物量及植被-土壤碳密度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3074-3083. [Gao Li, Zhu Qingfang, Yan Zhijian, et al. Effects of grazing on plant biomass and the carbon density of vegetation and soil in the *Artemisia ordosica* shrubland of the Ordos Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3074-3083.]

[29] Holben B N, Justice C O. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46: 1191-1200.

[30] Wang R J, Yan F, Wang Y J. Vegetation growth status and topographic effects in the Pisha Sandstone Area of China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2749-2759.

[31] Fen L, Wei C, Yuan Z, et al. Improving estimates of grassland fractional vegetation cover based on a pixel dichotomy model: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Remote Sensing, 2014, 6(6): 4705-4722.

[32] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18. [Wang Yuanchang, Wu Yonghong, Kou Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2007, 5(1): 14-18.]

[33] 杨静涵. 基于三维模拟的黄土丘陵沟壑区小流域土壤养分特征差异分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. [Yang Jinghan. Difference Analysis of Soil Nutrient Characteristics in Small Watershed in Loess Hilly Region Based on the Three-Dimensional Simulation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.]

[34] 贾海坤, 刘颖慧, 徐霞, 等. 皇甫川流域柠条林地水分动态模拟-坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系[J]. 植物生态学报, 2005, 51(6): 44-51. [Jia Haikun, Liu Yinghui, Xu Xia, et al. Simulation of soil water dynamics in a *Caragana intermedia* woodland in Huangfuchuan watershed: Relationship among slope, aspect, plant density and soil water content[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 51(6): 44-51.]

[35] 翟鹏程. 基于遥感的植被生物量估算及其承载力评价[D]. 唐山: 华北理工大学, 2018. [Zhai Pengcheng. Estimation of Vegetation Biomass Based on Remote Sensing and Its Bearing Capacity Evaluation[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2018.]

[36] 张占清. 2011年异常气候影响下的鄂尔多斯[J]. 内蒙古气象, 2011, 35(6): 123-124. [Zhang Zhanqing. Ordos under the influence of abnormal climate in 2011[J]. Inner Mongolia Meteorology, 2011, 35(6): 123-124.]

[37] 姜亚东, 郭威星, 秦玉英, 等. 西鄂尔多斯不同灌丛类型地上生物量与土壤理化性质研究[J]. 环境与发展, 2023, 35(3): 38-47. [Jiang Yadong, Guo Weixing, Qin Yuying, et al. Study on aboveground biomass and soil physicochemical properties of different shrub types in Western Ordos[J]. Environment and Development, 2023, 35(3): 38-47.]

A study on the potential for vegetation restoration in the soft rock area of the Ordos Plateau

QI Zhao, YAN Feng, XI Lei, CAO Xiaoming, ZOU Jiaxiu, FENG Yiming

(Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Evaluating the vegetation-carrying capacity of the soft rock area in the Yellow River Basin can provide a scientific basis for vegetation restoration and land degradation management. In this study, a representative portion of the Ordos Plateau soft rock area was divided into habitat types based on the varying distribution of vegetation under different topographic factors. Changes in vegetation type within different habitats from 2000 to 2022 were analyzed, and the carrying potential was quantified by the aboveground biomass obtained from the inversion of vegetation coverage. Vegetation cover of the Ordos Plateau increased slowly at a rate of 3.7% per year, with the highest growth rate observed in the bare soft rock region and the lowest in the sand-covered soft rock region. The aboveground biomass of the entire area increased by 115.5% in 2022 relative to that in 2000, reaching 219.49 $g\cdot m^{-2}$, with the annual average aboveground biomass being highest in the overlying soft rock region (185.29 $g\cdot m^{-2}$). The changes in vegetation cover and the spatial distribution of aboveground biomass were similar, with high values in southeast and low values in northwest. Compared with the actual aboveground biomass, the aboveground biomass of vegetation in bare, sand-covered, and soil-covered soft rock areas accounted for 75.2%, 80.9% and 84.2% of the carrying potential, respectively. In general, vegetation increased in all regions over the study period, with remaining growth potential, particularly in the exposed arsenic sandstone region.

Keywords: the soft rock area; vegetation carrying capacity; above-ground biomass; vegetation coverage; ecological governance